

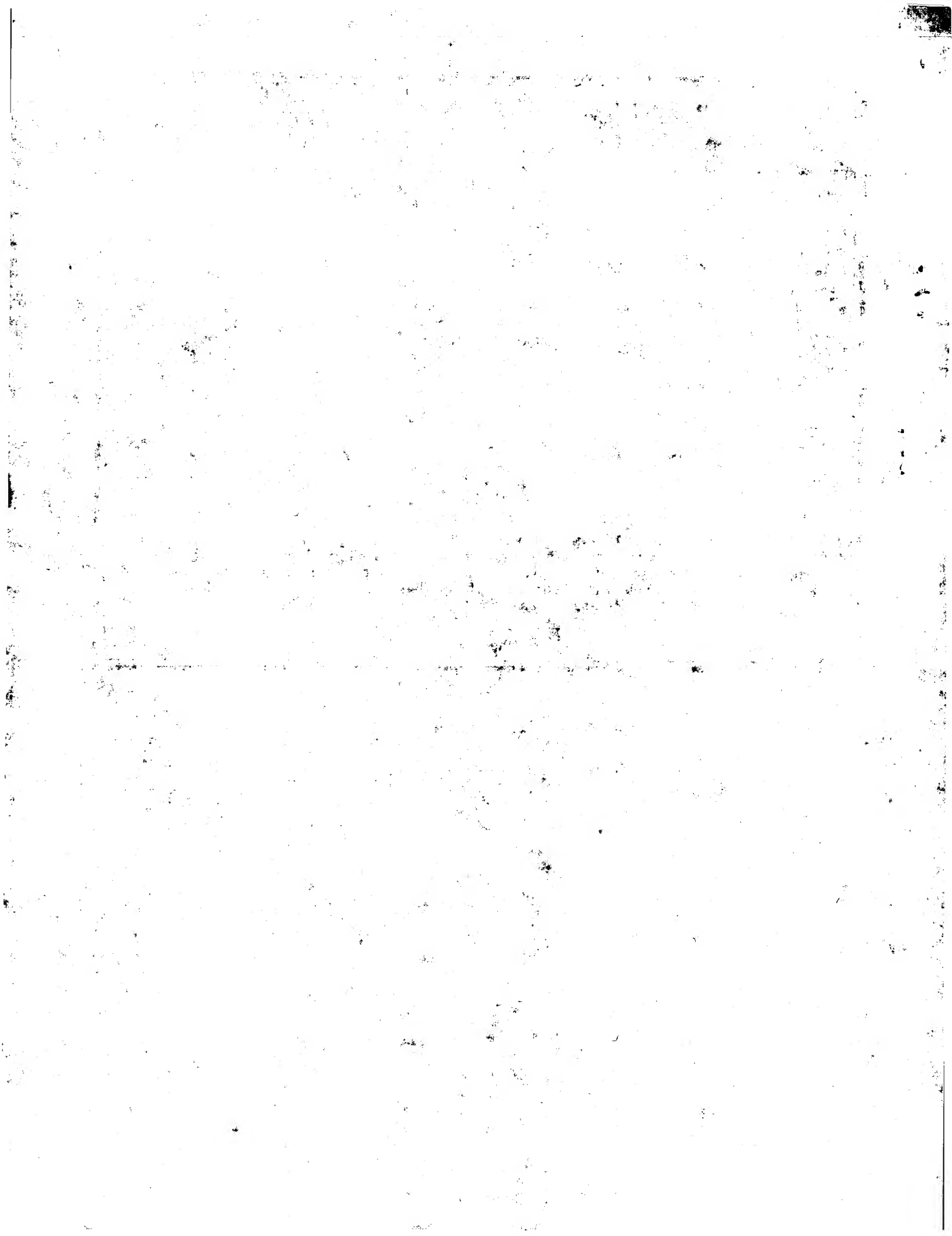
No English title available.

Patent Number: DE10130212
Publication date: 2003-01-02
Inventor(s): DOBSCHAL HANS-JUERGEN (DE); HAGE KNUT (DE); BRUNNER ROBERT (DE);
RUDOLF KLAUS (DE); STEINER REINHARD (DE)
Applicant(s): ZEISS CARL JENA GMBH (DE)
Requested
Patent: ☒ DE10130212
Application
Number: DE20011030212 20010622
Priority Number
(s): DE20011030212 20010622
IPC
Classification: G02B21/02; G02B13/00
EC
Classification: G02B21/02
Equivalents: ☐ WO03001272

Abstract

The invention relates to a lens (1), especially a microscope lens, said lens comprising a first lens group (5) on the side of the object, having a positive refractive power, and a second lens group (6) arranged downstream from the first lens group (5), having negative refractive power. Said first lens group (5) comprises several refractive elements (7, 8, 9, 10). The first lens group (5) contains at least one diffractive element (11) which increases refraction and has an achromatising effect.

Data supplied from the **esp@cenet** database - I2





①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenl gungsschrift**
⑩ **DE 101 30 212 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁷:
G 02 B 21/02
G 02 B 13/00

②1 Aktenzeichen: 101 30 212.6
②2 Anmeldetag: 22. 6. 2001
④3 Offenlegungstag: 2. 1. 2003

DE 101 30 212 A 1

⑦1 Anmelder:
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

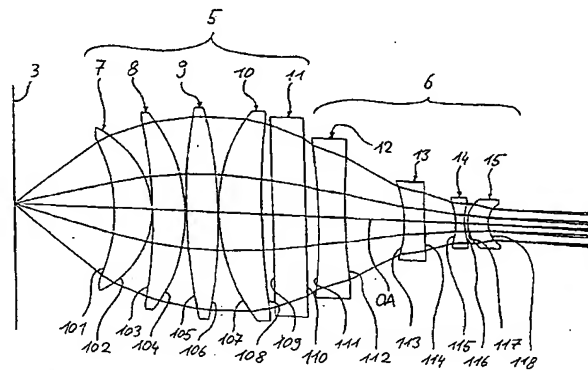
⑦4 Vertreter:
Dr. Werner Geyer, Klaus Fehners & Partner, 80687
München

⑦2 Erfinder:
Dobschal, Hans-Jürgen, 99510 Kleinromstedt, DE;
Rudolf, Klaus, 07749 Jena, DE; Steiner, Reinhard,
07646 Stadtroda, DE; Brunner, Robert, 07743 Jena,
DE; Hage, Knut, 99510 Apolda, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 **Objektiv**

⑤7 Bei einem Objektiv (1), insbesondere einem Mikroskopobjektiv, wobei das Objektiv eine objektseitige erste Optikgruppe (5) mit positiver Brechkraft und eine der ersten Optikgruppe (5) nachgeschaltete zweite Optikgruppe (6) mit negativer Brechkraft aufweist und wobei die erste Optikgruppe (5) mehrere refraktive Elemente (7, 8, 9, 10) umfaßt, enthält die erste Optikgruppe (5) zumindest ein diffraktives Element (11), das brechungsverstärkend und achromatisierend wirkt.



DE 101 30 212 A 1

- [0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Objektiv, insbesondere ein Mikroskopobjektiv, wobei das Objektiv eine objektseitige, erste Optikgruppe mit positiver Brechkraft und eine der ersten Optikgruppe nachgeschaltete, zweite Optikgruppe mit negativer Brechkraft aufweist, und wobei die erste Optikgruppe mehrere refraktive Elemente enthält.
- [0002] Ein solches Mikroskopobjektiv wird beispielsweise bei Mikroskopen zur optischen Kontrolle von Masken, die zur Herstellung von Halbleiterbauelementen verwendet werden, eingesetzt. Solche Masken umfassen z. B. ein Quarz-Substrat, auf dem die Maskenstruktur mittels Chrom gebildet ist. Darauf ist zum Schutz dieser Maske eine abnehmbare Schicht aus Kunststoff aufgebracht, deren der Maskenstruktur abgewandte Fläche einen Abstand von 7,5 mm zur Maskenstruktur aufweist. Damit die zur optischen Kontrolle notwendige Auflösung erreicht wird, weist das Mikroskopobjektiv eine numerische Apertur von größer als 0,5 auf, wobei dann aber der Arbeitsabstand des Mikroskopobjektivs in der Regel weniger als 1 mm beträgt. Dies führt dazu, daß zur Kontrolle der Maske die Schutzschicht abgenommen werden muß, was einerseits den Arbeitsaufwand bei der Kontrolle erhöht und was andererseits die Gefahr mit sich bringt, daß auf die Maske unerwünschterweise Partikel aufgebracht werden, die die Maskenqualität deutlich verringern.
- [0003] Ferner ist es bei einem solchen Mikroskopobjektiv bei Wellenlängen kleiner als 266 nm noch notwendig, zur Achromatisierung Linsen aus Flußspat und Linsen aus Quarzglas vorzusehen. Flußspat ist aber sehr teuer und auch außerordentlich schwierig mit der notwendigen Genauigkeit zu bearbeiten und weist darüber hinaus noch nachteilig hygroskopische Eigenschaften auf.
- [0004] Ausgehend hiervon ist es Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Objektiv, insbesondere ein Mikroskopobjektiv, der eingangs genannten Art so weiterzubilden, daß es eine hohe numerische Apertur und gleichzeitig einen großen Arbeitsabstand aufweist.
- [0005] Die Aufgabe wird bei einem Objektiv der eingangs genannten Art dadurch gelöst, daß die erste Optikgruppe zumindest ein diffraktives Element enthält, das brechungsverstärkend und achromatisierend wirkt.
- [0006] Als positive Brechkraft bzw. positive Wirkung (z. B. der ersten Optikgruppe) wird hier die Eigenschaft verstanden, die Divergenz eines Strahlenbündels zu verringern oder in eine Konvergenz zu verwandeln oder Konvergenz zu verstärken. Im Hinblick auf die erste Optikgruppe gilt dies zumindest für das Licht einer Beugungsordnung des diffraktiven Elementes. Für das Licht der zumindest einen Beugungsordnung weist somit das diffraktive Element selbst auch eine positive Brechkraft und somit eine brechungsverstärkende Wirkung auf. Als negative Brechkraft bzw. negative Wirkung (z. B. der zweiten Optikgruppe) wird hier die Eigenschaft verstanden, die Divergenz eines Strahlenbündels zu vergrößern bzw. die Konvergenz eines Strahlenbündels zu verringern oder auch in eine Divergenz umzuwandeln. Die achromatisierende Wirkung des diffraktiven Elementes besteht daher für die zumindest eine Beugungsordnung, für die das diffraktive Element auch brechungsverstärkend wirkt.
- [0007] Mit dem diffraktiven Element umfaßt das erfindungsgemäße Objektiv ein Optikelement, mit dem vorteilhaft z. B. die sphärische Aberration und Koma des erfindungsgemäßen Objektivs verbessert werden können und das gleichzeitig noch zur Achromatisierung des Objektivs beiträgt, da die Dispersion des diffraktiven Elements gegenläufig ist zur Dispersion der refraktiven Elemente des erfindungsgemäßen Objektivs.
- [0008] Somit müssen bei dem erfindungsgemäßen Objektiv für Anwendungen im UV-Bereich (Wellenlängen kleiner 300 nm) nicht Linsen aus Flußspat zur Achromatisierung eingesetzt werden, so daß seine Herstellung vereinfacht ist im Vergleich zu einem herkömmlichen Objektiv, das aufgrund der geforderten Achromatisierung auch Linsen aus Flußspat enthält.
- [0009] Insbesondere können bei dem erfindungsgemäßen Objektiv die Materialien für die optischen Elemente unabhängig von der notwendigen Achromatisierung im Hinblick auf andere wichtige Eigenschaften (wie z. B. Bearbeitbarkeit oder Transmissionseigenschaften) ausgewählt werden, wobei die optischen Elemente alle aus dem gleichen oder auch aus unterschiedlichen Materialien hergestellt sein können.
- [0010] Ferner besitzt das diffraktive Element eine relativ hohe positive Brechkraft (bzw. hohe positive Wirkung) im Vergleich zu einem refraktiven Element, so daß die Anzahl der Elemente des erfindungsgemäßen Objektivs im Vergleich zu einem aus ausschließlich refraktiven Elementen gebildeten Objektiv deutlich verringert ist. Dies ist insbesondere bei Hochleistungsobjektiven, die für einen Wellenlängenbereich von einigen Nanometern oder weniger achromatisiert sind, von besonderem Vorteil, da aufgrund der extrem hohen Genauigkeit, mit der die optischen Elemente gefertigt und justiert werden müssen, jedes eingesparte Element zu einem deutlich kostengünstigeren und schneller herzustellenden Objektiv führt.
- [0011] Des weiteren läßt sich auch noch vorteilhaft eine sehr viel kürzere Baulänge des erfindungsgemäßen Objektivs im Vergleich zu einem herkömmlichen Objektiv (rein refraktiv) mit gleicher Apertur und gleichem Arbeitsabstand realisieren, wodurch sich das erfindungsgemäße Objektiv leicht als Austauschobjektiv realisieren läßt, das in schon vorhandene Geräte, wie z. B. optische Inspektionssysteme und Mikroskope, eingesetzt werden kann, ohne daß dazu diese Geräte verändert werden müssen. Dadurch können diese Geräte problemlos mit dem erfindungsgemäßen Objektiv, das eine sehr hohe numerische Apertur und gleichzeitig einen sehr großen Arbeitsabstand aufweist, einfach nachgerüstet werden.
- [0012] Das diffraktive Element kann bevorzugt so ausgelegt werden, daß neben seiner achromatisierenden Wirkung für das Objektiv und brechungsverstärkenden Wirkung für die erste Optikgruppe auch noch sphärische Fehler höherer Ordnung, die durch die restlichen, optischen Elemente des erfindungsgemäßen Objektivs erzeugt werden, kompensiert werden.
- [0013] Des weiteren können durch das diffraktive Element, das im erfindungsgemäßen Objektiv die achromatisierende Wirkung übernimmt, die bei einem ausschließlich aus refraktiven Elementen bestehenden Objektiv aufgrund der notwendigen Achromatisierung auftretenden Schwierigkeiten der zu schmalen Randdicken der Linsen und der zu geringen Luftabstände zwischen den Linsen insbesondere an den Linsenrändern, was die Fassungstechnologie außerordentlich kompliziert, vermieden werden, so daß vorteilhaft die Fassung der optischen Elemente beim erfindungsgemäßen Objektiv deutlich vereinfacht ist. Auch deswegen läßt sich das erfindungsgemäße Objektiv kostengünstig und schnell herstellen.

- [0014] In einer bevorzugten Weiterbildung des erfindungsgemäßen Objektivs sind alle optischen Elemente der beiden Optikgruppen aus maximal zwei unterschiedlichen Materialien, bevorzugt aus dem gleichen Material, gebildet. Da die Achromatisierung durch das diffraktive Element bewirkt wird, können Materialien gewählt werden, die für den Spektralbereich, für den das erfindungsgemäße Objektiv eingesetzt werden soll, am besten geeignet sind. Man kann z. B. das Material mit den besten Transmissionseigenschaften und/oder das Material, das am leichtesten zu bearbeiten ist, auswählen. So können die Elemente bspw. aus Quarz und/oder Calciumfluorid bestehen. 5
- [0015] Bei einem Wellenlängenbereich von $193\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$, $213\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$, $248\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$ und $266\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$ ist Suprasil (synthetischer Quarz) bevorzugt und bei $157\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$ ist Flußspat das bevorzugte Material. 10
- [0016] Insbesondere ist das erfindungsgemäße Objektiv so ausgelegt, daß die gewünschte Achromatisierung des Objektivs für einen vorgegebenen Wellenlängenbereich vollständig von dem zumindest einen diffraktiven Element bewirkt wird. Wenn die gewünschte Achromatisierung die vollständige Achromatisierung des Objektivs ist, können dem Objektiv nachgeschaltete Optikanordnungen, wie z. B. eine Tubuslinse bei einem Mikroskop, bezüglich ihrer Achromatisierungseigenschaften völlig unabhängig vom Objektiv ausgelegt werden. Alternativ kann die gewünschte Achromatisierung eine nicht vollständige Achromatisierung des erfindungsgemäßen Objektivs sein, so daß das aus dem Objektiv austretende Lichtbündel nicht vollständig achromatisiert ist. Den fehlenden Beitrag zur vollständigen Achromatisierung kann dann, falls gewünscht, eine dem Objektiv nachgeschaltete Optikanordnung (z. B. eine Tubuslinse bei einem Mikroskop) liefern. 15
- [0017] Wesentlich bei dem erfindungsgemäßen Objektiv ist es, daß die Achromatisierung der refraktiven Elemente (die bevorzugt selbst überhaupt nicht achromatisiert sind) des erfindungsgemäßen Objektivs im wesentlichen oder auch ausschließlich durch das zumindest eine diffraktive Element (oder auch durch mehrere diffraktive Elemente) bewirkt wird. Die zweite Optikgruppe enthält bevorzugt kein diffraktives sondern nur ein einzelnes oder auch mehrere refraktive Elemente. Natürlich kann in der zweiten Optikgruppe aber auch ein oder mehrere diffraktive Elemente enthalten sein. 20
- [0018] Bevorzugt sind bei dem erfindungsgemäßen Objektiv die optischen Elemente der beiden Optikgruppen kittfrei gehalten, so daß vorteilhaft der bei Systemen mit optischem Kitt auftretende Nachteil der Alterung des Kitts, was insbesondere bei Wellenlängen im UV-Bereich auftritt und dort eine große Schwierigkeit darstellt, vermieden wird. Dadurch kann eine sehr lange Einsatzdauer des erfindungsgemäßen Objektivs gewährleistet werden. 25
- [0019] Bei dem erfindungsgemäßen Objektiv ist vorteilhaft der maximale Bündeldurchmesser in der ersten Optikgruppe größer als der maximale Bündeldurchmesser in der zweiten Optikgruppe. Dadurch läßt sich eine hohe numerische Apertur bei kurzer Baulänge des erfindungsgemäßen Objektivs realisieren, wodurch insbesondere bei der Verwendung des erfindungsgemäßen Objektivs in einem Mikroskop eine hohe Auflösung erzielt werden kann. 30
- [0020] Das diffraktive Element des erfindungsgemäßen Objektivs ist bevorzugt ein zur optischen Achse des Objektivs rotationssymmetrisches Gitter, so daß der Einbau und die Justierung des diffraktiven Elements im erfindungsgemäßen Objektiv aufgrund dieser Symmetrie vereinfacht ist. Damit wird auch eine schnelle Herstellung des erfindungsgemäßen Objektivs ermöglicht.
- [0021] Eine vorteilhafte Weiterbildung des Objektivs besteht darin, daß das diffraktive Element ein transmissives Gitter, bevorzugt ein Phasengitter, aufweist, dessen Gitterfrequenz von der optischen Achse des Objektivs radial nach außen zunimmt. Das Gitter kann beispielsweise durch ringförmige Vertiefungen, die konzentrisch zur optischen Achse sind, gebildet werden, wobei das Gitter bevorzugt auf einer planen Fläche gebildet ist. Diese plane Fläche kann entweder eine Fläche einer planparallelen Platte oder auch einer Linse der ersten Optikgruppe sein. Das Vorsehen des Gitters auf einer planen Fläche erleichtert seine Herstellung. 35
- [0022] Alternativ kann das Gitter auch auf einer gekrümmten Wirk- bzw. Grenzfläche eines der diffraktiven Elemente der ersten Optikgruppe gebildet sein. In diesem Fall wird vorteilhaft die Anzahl der optischen Elemente nochmals verringert, so daß die Fertigung des erfindungsgemäßen Objektivs schneller und kostengünstiger erfolgen kann.
- [0023] Des weiteren ist es bei dem erfindungsgemäßen Objektiv vorteilhaft, das diffraktive Element in dem Bereich mit größtem Bündeldurchmesser in der ersten Optikgruppe anzuordnen, da dort die hohe Brechkraft des diffraktiven Elements am effektivsten eingesetzt werden kann. Auch wird das Streulicht (Licht nicht gewünschter Ordnungen) an den Fassungen der dem diffraktiven Element nachfolgenden Linsen zum großen Teil abgeschattet oder verläßt das Objektiv mit einer deutlich anderen Schnittweite als das Nutzlicht (das zur Abbildung verwendet wird), so daß das Streulicht sehr stark aufgeweitet wird und dadurch zu einer höchstens sehr geringen Verschlechterung der Abbildung führt. 40
- [0024] Besonders vorteilhaft wird das Gitter als Blaze-Gitter ausgebildet, so daß die Lichtsammeleffektivität des Gitters für eine gewünschte Beugungsordnung außerordentlich hoch ist. Das Licht dieser Beugungsordnung ist das Nutzlicht, das mittels der dem diffraktiven Element nachgeschalteten, optischen Elemente des erfindungsgemäßen Objektivs abgebildet wird und als Strahlbündel, das achromatisiert ist, das Objektiv verlassen soll. 45
- [0025] Wenn das Blaze-Gitter mittels des holografischen Stehwellenverfahrens gebildet wird, sind die Flanken der Vertiefungen stetig und müssen nicht durch eine Treppenfunktion angenähert werden, so daß vorteilhaft so gut wie kein diffuses Streulicht, das die Abbildungseigenschaft des Objektivs verschlechtern würde, auftritt. 50
- [0026] Um möglichst nah an die theoretisch optimale Beugungseffizienz heranzukommen, sind in einer bevorzugten Weiterbildung die Vertiefungen des diffraktiven Elements des erfindungsgemäßen Objektivs so gebildet, daß mit zunehmendem radialem Abstand der Vertiefung von der Mitte die Tiefe der einzelnen Vertiefungen abnimmt.
- [0027] Alternativ können die Vertiefungen aber auch so gebildet sein, daß sie alle gleich tief ausgebildet sind. In diesem Fall ist die Herstellung des Gitters vereinfacht, und es kann beispielsweise mittels aus der Halbleiterproduktion bekannter Strukturierungsverfahren gebildet werden. 55
- [0028] Bei einem Gitter mit konstanter Tiefe ist es besonders bevorzugt, wenn die optimale Tiefe für den Randbereich des diffraktiven Elements als die Tiefe gewählt wird, die alle Vertiefungen aufweisen, da der Randbereich aufgrund seiner größeren Fläche im Vergleich zum Mittelbereich des Gitters am meisten zur Lichtsammlung beiträgt und der äußere Bereich einen großen Beitrag zur Apertur liefert und damit am stärksten die Auflösung des erfindungsgemäßen Objektivs bestimmt. Aus dem gleichen Grund werden auch bei dem Gitter mit den Vertiefungen mit unterschiedlicher Tiefe bevorzugt die Vertiefungen im Randbereich mit der optimalen Tiefe gebildet. 60 65

- [0029] Eine besonders bevorzugte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Objektivs besteht darin, daß nur das gebeugte Licht einer vorgegebenen Ordnung, bevorzugt der positiven oder negativen ersten Ordnung, des diffraktiven Elementes als achromatisiertes und brechungsverstärktes Licht zur Abbildung eingesetzt wird und daß das gebeugte Licht anderer Ordnungen nicht zu verwendendes Streu- bzw. Falschlicht ist.
- 5 [0030] In einer weiteren, vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Objektivs ist eine kreisförmige Zentralabschattungsblende auf oder nahe am diffraktiven Element vorgesehen, die konzentrisch zur optischen Achse des Objektivs angeordnet ist und deren Durchmesser bevorzugt so gewählt ist, daß das Beugungslicht nullter Ordnung, das nicht durch die Fassungen der dem diffraktiven Element nachfolgenden, optischen Elemente abgeblendet wird, sicher abgeschattet wird. Damit wird mit dem Beugungslicht nullter Ordnung die Abbildungseigenschaft des erfindungsgemäßen
- 10 Objektivs nicht nachteilig verschlechtert. Der Durchmesser kann durchaus auch mindestens so groß wie der Bündeldurchmesser des aus der zweiten Optikgruppe austretenden Strahlenbündels gewählt werden. Dadurch wird vorteilhaft erreicht, daß sicher kein Beugungslicht nullter Ordnung die Abbildung verschlechtert.
- [0031] Des weiteren können bei einer bevorzugten Weiterbildung des erfindungsgemäßen Objektivs alle refraktiven Elemente der ersten Optikgruppe jeweils positive Brechkraft aufweisen. Dadurch wird es möglich, daß die erste Optik-
- 15 gruppe insgesamt eine sehr hohe positive Brechkraft bei großer Apertur aufweist, wodurch die Auflösung sehr groß ist.
- [0032] Ferner kann die zweite Optikgruppe nur Elemente mit negativer Brechkraft aufweisen, wodurch in einfacher Art und Weise das gewünschte Strahlenbündel, das aus der zweiten Optikgruppe austreten soll und das bevorzugt ein paralleles Strahlenbündel ist, mittels der zweiten Optikgruppe erzeugt werden kann.
- [0033] Die Erfindung wird nachfolgend beispielshalber anhand der Zeichnungen beschrieben. Von den Figuren zeigen:
- 20 [0034] Fig. 1 einen Linsenschnitt des optischen Aufbaus des erfindungsgemäßen Mikroskopobjektivs plus Tubuseinheit;
- [0035] Fig. 2 eine vergrößerte Ansicht des in Fig. 1 gezeigten Mikroskopobjektivs;
- [0036] Fig. 3 ein Diagramm, das die Gitterfrequenz des diffraktiven, optischen Elements zeigt;
- [0037] Fig. 4 einen Querschnitt des erfindungsgemäßen Mikroskopobjektivs und
- 25 [0038] Fig. 5 eine schematische Ansicht zur Erläuterung der Herstellung des diffraktiven, optischen Elements.
- [0039] Wie aus dem in Fig. 1 gezeigten Linsenschnitt des optischen Aufbaus eines Mikroskops ersichtlich ist, ist ein Mikroskopobjektiv 1 und eine diesem nachgeschaltete Tubuseinheit 2 vorgesehen, um ein in der Objektebene 3 befindliches Objekt vergrößert in die Bildebene 4 (bzw. Zwischenbildebene) abzubilden. Bei dem Mikroskopobjektiv 1 handelt es sich um ein Hochleistungsobjektiv, das in Mikroskopen eingesetzt wird, die bspw. bei der Kontrolle von Masken zur
- 30 Halbleiterherstellung verwendet werden. Das hier beschriebene Mikroskopobjektiv 1 ist für einen Spektralbereich von $193\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$ achromatisiert und weist eine 50-fache Vergrößerung bei einer numerischen Apertur von 0,65 und einem Arbeitsabstand von 7,8 mm auf, wobei der Objektfelddurchmesser 0,1 mm und der Bildfelddurchmesser 5,0 mm beträgt.
- [0040] Das Mikroskopobjektiv 1 enthält, wie am besten aus der vergrößerten Darstellung in Fig. 2 zu entnehmen ist, eine objektseitige, erste Optikgruppe 5 mit positiver Brechkraft (bzw. positiver Wirkung) und eine der ersten Optik-
- 35 gruppe 5 nachgeschaltete, zweite Optikgruppe 6 mit negativer Brechkraft (bzw. negativer Wirkung), wobei alle optischen Elemente der beiden Optikgruppen 5 und 6 aus dem gleichen Material, nämlich Suprasil (synthetischer Quarz), gebildet sind.
- [0041] Die erste Optikgruppe 5 weist, in Fig. 2 von links nach rechts gesehen, eine erste, zweite, dritte und vierte Linse
- 40 7, 8, 9 und 10 sowie ein diffraktives, optisches Element 11 auf. Eine fünfte, sechste, siebte und achte Linse 12, 13, 14 und 15 bilden die zweite Optikgruppe 6. Die Ausbildung der Linsen 7 bis 10 und 12 bis 15 und die Anordnung aller optischen Elemente 7 bis 15 des Mikroskopobjektivs 1 kann der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

DE 101 30 212 A 1

Tabelle 1

Fläche bis Fläche	Abstand [mm]	Fläche	Radius [mm]	freier Durchmesser [mm]	
3 – 101	10,1	101	19,525 konkav	14,9	5
101 – 102	3,7	102	10,442 konkav	16,4	
102 – 103	0,1	103	58,714 konkav	19,3	
103 – 104	3,3	104	19,248 konkav	20,1	10
104 – 105	0,15	105	66,836 konvex	21,5	
105 – 106	3,2	106	57,874 konkav	21,7	
106 – 107	0,1	107	20,684 konvex	21,5	15
107 – 108	4,3	108	97,407 konvex	20,7	
108 – 109	1,1	109	plan	20,4	
109 – 110	3,2	110	plan	17,6	20
110 – 111	1,3	111	81,748 konkav	16,1	
111 – 112	2,6	112	73,387 konvex	13,6	
112 – 113	5,9	113	15,07 konkav	7,6	25
113 – 114	2,0	114	81,748 konvex	6,5	
114 – 115	3,16	115	7,718 konkav	4,8	
115 – 116	0,9	116	8,292 konvex	4,5	
116 – 117	0,3	117	3,599 konvex	4,6	30
117 – 118	2,06	118	2,973 konvex	3,6	

[0042] Die Tubuslinse 2 weist, wie in Fig. 1 gezeigt ist, Linsen 16, 17 und 18 auf, deren Aufbau und Anordnung der folgenden Tabelle entnommen werden kann. 35

Tabelle 2

Fläche bis Fläche	Abstand [mm]	Fläche	Radius [mm]	
118 – 119	99,87	119	107,46 konvex	40
119 – 120	5,7	120	42,17 konkav	
120 – 121	1,13	121	40,388 konkav	45
121 – 122	3,8	122	281,84 konkav	
122 – 123	9,0	123	plan	
123 – 124	40,04	124	plan	50
124 – 4	120,65			

[0043] Das diffraktive, optische Element 11 ist ein transmissives Phasengitter, bei dem in der der Objektebene 3 zugewandten Fläche 109 konzentrisch zur optischen Achse OA des Objektivs 1 angeordnete, ringförmige Furchen ausgebildet sind. 55

[0044] Das diffraktive, optische Element 11 ist dabei so ausgelegt, daß es einerseits brechungsverstärkend für die erste Optikgruppe 5 ist (d. h. eine Erhöhung der positiven Wirkung bzw. positiven Brechkraft) und daß es andererseits vollständig die Achromatisierung im gegebenen Spektralbereich ($193 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$) für das Objektiv 1 bewirkt, wobei hier das gebeugte Licht der positiven, ersten Ordnung als Nutzlicht für die Abbildung verwendet wird. Das gebeugte Licht anderer Ordnungen ist Streulicht, das möglichst nicht zur Abbildung beitragen soll, um diese nicht zu verschlechtern. 60

[0045] Als positive, erste Ordnung wird die erste Beugungsordnung bezeichnet, bei der ein Parallelstrahl (ein Strahl parallel zur optischen Achse OA des Objektivs) zur optischen Achse OA hin abgelenkt wird. Die erste Beugungsordnung, bei der ein Parallelstrahl von der optischen Achse OA weg gebeugt wird, wird hingegen als negative, erste Beugungsordnung bezeichnet. 65

[0046] Der Ablenkwinkel für das gebeugte Licht der positiven, ersten Ordnung wird über die Gitterfrequenz des diffraktiven, optischen Elements 11 eingestellt. Praktisch kann die Gitterfrequenz mittels Optimierungsrechnungen ausgehend von dem folgenden Phasenpolynom $p(r)$: 65

$$p(r) = \sum_{i=1}^N a_i r^{2i}$$

- berechnet werden, wobei r der radiale Abstand von der Mitte M des Phasengitters und N eine positive, ganze Zahl größer 1 ist. Zur Optimierung werden die Koeffizienten a_i verändert. Das Phasenpolynom $p(r)$ gibt die Phasenverschiebung in Abhängigkeit vom radialen Abstand r an, und aus der Ableitung des Phasenpolynoms nach dem radialen Abstand r läßt sie die Gitterfrequenz des diffraktiven Elements berechnen. Aus dieser Gitterfrequenz wiederum kann dann für jeden einfallenden Strahl dessen Ausfallwinkel ermittelt werden, wodurch sich dann die achromatisierende und brechungsverstärkende Wirkung des Gitters bestimmen läßt. Bei dieser Optimierungsrechnung können auch noch andere Aberrationen der Linsen 7 bis 10 und 12 bis 15 (wie z. B. höhere, sphärische Fehler) mit korrigiert werden, wobei für N bevorzugt ein Wert von 3 bis 10 gewählt wird.
- [0047] In Fig. 3 ist der Verlauf der Gitterfrequenz in einem Zentralschnitt eines in dieser Art und Weise optimierten diffraktiven, optischen Elementes 11 gezeigt. Dabei ist auf der Abszisse der Abstand von der Gittermitte M aufgetragen (eine Unterteilung entspricht 5 mm), und auf der Ordinate sind die Anzahl der Linien (Furchen) pro mm aufgetragen, wobei am Schnittpunkt von Ordinate und Abszisse der Nullpunkt liegt und jede Unterteilung der Ordinate 500 Linien pro mm entspricht. Aus Fig. 3 ist somit ersichtlich, daß die Gitterfrequenz von 0 Linien pro mm (in der Mitte M) mit radial größer werdendem Abstand von der Mitte M bis zu der Maximalfrequenz von 1841 Linien pro mm zunimmt.
- [0048] Eine theoretisch optimale Beugungseffizienz kann bei einem solchen Gitter dann erreicht werden, wenn die Tiefe der einzelnen Vertiefungen mit zunehmendem radialem Abstand der Vertiefungen von der Mitte geringer gewählt wird, so daß die Tiefe einer Vertiefung im Randbereich des Gitters geringer ist als die Tiefe einer Vertiefung, die weiter innen liegt. Ein solches Gitter kann mit dem nachfolgend noch beschriebenen holographischen Stehwellenverfahren in vorteilhafter Weise leicht hergestellt werden, da bei diesem Verfahren die gewünschte Tiefenverteilung gleich mit erzeugt wird. Alternativ kann das Gitter auch so hergestellt werden, daß die Furchen bevorzugt alle gleich tief sind, wobei die Tiefe auf den optimalen Wert (z. B. 300 nm) für den Randbereich des optischen, diffraktiven Elementes 11 festgelegt wird, da der Randbereich aufgrund seiner größeren Fläche im Vergleich zum zentralen Mittelbereich am meisten zur Lichtsammlung und damit auch am meisten zur Beugungseffizienz beiträgt. Des weiteren trägt der Randbereich am stärksten zur Auflösung des erfindungsgemäßen Objektivs bei. Das Gitter mit konstanter Furchentiefe und das Gitter mit variabler Tiefe kann mittels aus der Halbleiterproduktion bekannter Strukturierungsverfahren gebildet werden, wobei eine geeignete Lackschicht, die auf einem Substrat, in dem das Gitter gebildet werden soll, aufgebracht ist, belichtet (z. B. durch Maskenbelichtung oder Elektronenstrahlolithographie) und strukturiert wird. Die Struktur in der Lackschicht wird dann mittels bekannter Verfahren (wie z. B. reaktives Ionenätzen) in das Substrat übertragen. Dadurch kann das gewünschte Gitter mit der notwendigen Genauigkeit gebildet werden.
- [0049] Wie oben erwähnt wurde, wird das gebeugte Licht der positiven, ersten Ordnung für die Abbildung verwendet, so daß das Beugungslicht der anderen Ordnungen unerwünschtes Streulicht darstellt. Um den Einfluß dieses Streulichts auf die Abbildungsqualität möglichst gering zu halten, ist das diffraktive, optische Element 11 in der ersten Optikgruppe 5 in dem Bereich angeordnet, in dem der Bündeldurchmesser am größten ist. Damit wird schon ein großer Teil des Streulichts an den Fassungen der nachfolgenden Linsen 12 bis 15, bei denen der Bündeldurchmesser deutlich geringer ist, wie in Fig. 2 ersichtlich ist, abgeblendet. Ferner verläßt das Streulicht, das nicht durch die Fassungen der optischen Elemente 12 bis 15 abgeblendet wird, die dem diffraktiven, optischen Element 11 folgen, das Mikroskopobjektiv 1 aufgrund der hohen Strichzahl des diffraktiven, optischen Elements 11 mit einer deutlich anderen Schnittweite als die des gebeugten Lichts der positiven, ersten Ordnung, so daß das Streulicht aufgrund seiner konvergenten oder divergenten Ausbreitung auf seinem Weg zum Zwischenbild, das zwischen dem Mikroskopobjektiv 1 und der Tubuslinse 2 liegt, stark aufgeweitet wird und somit an den Fassungen der Tubuslinse 2 weitgehendst abgeblendet wird. Der sehr kleine Anteil, der nicht an der Tubuslinse 2 abgeblendet wird, gelangt nur stark defokussiert in das Bild, so daß sein Anteil zu keiner deutlichen Verschlechterung der Abbildung führt.
- [0050] Ferner ist das diffraktive, optische Element 11 so ausgelegt, daß es vollständig die Achromatisierung des Objektivs 1 im vorgegebenen Spektralbereich übernimmt, so daß alle Elemente 7 bis 15 des Mikroskopobjektivs 1 problemlos aus dem gleichen Material bestehen können. Damit kann das für die gewünschte Wellenlänge am besten geeignete Material, das beispielsweise die beste Transmission und/oder am leichtesten zu bearbeiten ist, ausgewählt werden.
- [0051] In Fig. 4 ist eine Schnittdarstellung des erfindungsgemäßen Mikroskopobjektivs 1 gezeigt, wobei auch die Fassungen der optischen Elemente 7 bis 15 mit eingezeichnet sind. Wie aus der Darstellung unmittelbar ersichtlich ist, ist das Mikroskopobjektiv 1 sehr kompakt und kittfrei aufgebaut, wobei es eine sehr geringe Anzahl von optischen Elementen (7 bis 15), einen großen Arbeitsabstand A von 7,8 mm bei einer numerischen Apertur von 0,65 aufweist. Aufgrund der sehr geringen Baulänge des Mikroskopobjektivs 1 kann es insbesondere auch modular in schon vorhandene Inspektionssysteme eingesetzt werden.
- [0052] Die Gitterstruktur in der Fläche 109 des diffraktiven, optischen Elements 11 kann holographisch erzeugt werden. Dazu wird auf einer Oberseite einer planparallelen Platte 11' (Suprasil) eine Lackschicht 19 aufgebracht, die dann mittels des holographischen Stehwellenverfahrens, wie in Fig. 5 schematisch gezeigt ist, belichtet wird. Die Lackschicht 19 ist für eine Belichtungswellenlänge von 458 nm ausgelegt und weist eine Dicke von 200 bis 500 nm auf.
- [0053] Bei dem holographischen Stehwellenverfahren werden zwei aufeinander zulaufende, kohärente Kugelwellen (bevorzugt Laserstrahlung) so überlagert, daß das in der Lackschicht 19 auftretende Interferenzmuster zur Belichtung der gewünschten, latenten Gitterstruktur führt. Die erste Kugelwelle hat dabei ihren Ursprung im Punkt 20 und breitet sich, in Fig. 5 gesehen, nach rechts aus. Die zweite Kugelwelle breitet sich gegenläufig zur ersten Kugelwelle aus, wobei sich ihr Fokus im Punkt 21 befindet. Die Abstände d_1 , d_2 der Punkte 20 und 21 von der Lackschicht 19 werden so gewählt, daß die gewünschte Gitterstruktur in der Lackschicht 19 belichtet wird. Der Abstand d_1 des Punktes 20 zur Oberseite der

DE 101 30 212 A 1

Lackschicht 19 beträgt 22,776 mm, und der Abstand d2 des Punktes 21 zur Oberseite der Lackschicht 19 beträgt 21,158 mm.

[0054] Nach der Belichtung der Lackschicht 19 wird diese entwickelt, so daß die Lackschicht 19 strukturiert ist und die gewünschte Gitterstruktur aufweist. Diese Gitterstruktur wird dann mittels reaktiven Ionenätzens (RIE) in die Oberfläche der planparallelen Platte 11' so übertragen, daß dabei die gewünschte Tiefe der Vertiefungen erreicht wird. Danach werden die eventuell noch vorhandenen Reste der Lackschicht 19 entfernt, so daß das diffraktive, optische Element 11 fertiggestellt ist.

[0055] Eine weitere Verbesserung der Abbildungseigenschaft des erfindungsgemäßen Objektivs kann dadurch erreicht werden, daß auf der Fläche 109 oder 110 des diffraktiven, optischen Elements 11 eine zentrale Abschattungsblende (nicht gezeigt) aufgebracht wird, die kreisförmig und konzentrisch zur optischen Achse OA angeordnet ist. Der Durchmesser dieser zentralen Abschattungsblende wird bevorzugt so groß wie der Bündeldurchmesser des aus der zweiten Optikgruppe 6 austretenden Strahlenbündels gewählt. Damit wird erreicht, daß das Beugungslicht nullter Ordnung aus dem Mittelbereich um die optische Achse OA abgeschattet wird und somit nicht in die zweite Optikgruppe 6 eintritt, wodurch eine Verschlechterung der Abbildungseigenschaft des Objektivs 1 durch das Beugungslicht nullter Ordnung aus dem Mittelbereich verhindert wird. Das Beugungslicht nullter Ordnung, das nicht durch die Abschattungsblende aufgefangen wird, wird durch die Fassungen der dem diffraktiven Element 11 nachgeschalteten Linsen 12 bis 15 abgeblendet, so daß durch die Abschattungsblende vorteilhaft bessere Abbildungseigenschaften erzielt werden.

Patentansprüche

1. Objektiv (1), insbesondere Mikroskopobjektiv, wobei das Objektiv eine erste Optikgruppe (5) mit positiver Brechkraft und eine der ersten Optikgruppe (5) nachgeschaltete, zweite Optikgruppe (6) mit negativer Brechkraft aufweist und wobei die erste Optikgruppe (5) mehrere refraktive Elemente (7, 8, 9, 10) enthält, **dadurch gekennzeichnet**, daß die erste Optikgruppe (5) zumindest ein diffraktives Element (11) enthält, das brechungsverstärkend und achromatisierend wirkt.
2. Objektiv (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die gewünschte Achromatisierung des Objektivs (1) für einen vorgegebenen Wellenlängenbereich vollständig von dem zumindest einen diffraktiven Element (11) bewirkt wird.
3. Objektiv (1) nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß alle optischen Elemente (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) der beiden Optikgruppen (5, 6) aus maximal zwei unterschiedlichen Materialien, bevorzugt aus dem gleichen Material, bestehen.
4. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß alle optischen Elemente (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15) der beiden Optikgruppen (5, 6) kittfrei gehalten sind.
5. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der maximale Bündeldurchmesser in der ersten Optikgruppe (5) größer ist als der maximale Bündeldurchmesser in der zweiten Optikgruppe (6).
6. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das diffraktive Element (11) ein zur optischen Achse (OA) des Objektivs (1) rotationssymmetrisches Gitter ist.
7. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das diffraktive Element (11) ein transmissives Phasengitter ist.
8. Objektiv (1) nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Gitterfrequenz des Gitters von der optischen Achse (OA) des Objektivs (1) radial nach außen hin zunimmt.
9. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Gitter ringförmige Vertiefungen aufweist, die konzentrisch zur optischen Achse (OA) des Objektivs (1) ausgerichtet sind.
10. Objektiv (1) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß alle Vertiefungen gleich tief ausgebildet sind.
11. Objektiv (1) nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß mit zunehmendem, radialem Abstand der Vertiefung von der optischen Achse (OA) des Objektivs die Tiefe der einzelnen Vertiefungen abnimmt.
12. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Gitter auf einer Seite einer planparallelen Platte ausgebildet ist.
13. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Gitter auf einer optischen Wirkfläche eines der refraktiven Elemente (7, 8, 9, 10) der ersten Optikgruppe (5) ausgebildet ist.
14. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Gitter ein Blaze-Gitter ist.
15. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß das zumindest eine diffraktive Element (11) im Bereich mit dem größten Bündeldurchmesser in der ersten Optikgruppe (5) angeordnet ist.
16. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß das gebeugte Licht einer vorbestimmten Ordnung, bevorzugt der positiven oder negativen, ersten Ordnung, des diffraktiven Elementes (11) zur Abbildung eingesetzt wird.
17. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß das diffraktive Element (11) eine kreisförmige Abschattungsblende aufweist, die konzentrisch zur optischen Achse (OA) des Objektivs (1) angeordnet, wobei bevorzugt deren Durchmesser so gewählt ist, daß er zumindest so groß ist wie der Bündeldurchmesser des aus der zweiten Optikgruppe (6) austretenden Strahlenbündels.
18. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß seine numerische Apertur größer als 0,5 und sein Arbeitsabstand (A) größer als 6 mm ist.
19. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 18, dadurch gekennzeichnet, daß alle refraktiven Elemente (7, 8, 9, 10) der ersten Optikgruppe (5) jeweils positive Brechkraft aufweisen.
20. Objektiv (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die zweite Optikgruppe (6) nur

DE 101 30 212 A 1

Elemente mit negativer Brechkraft aufweist.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

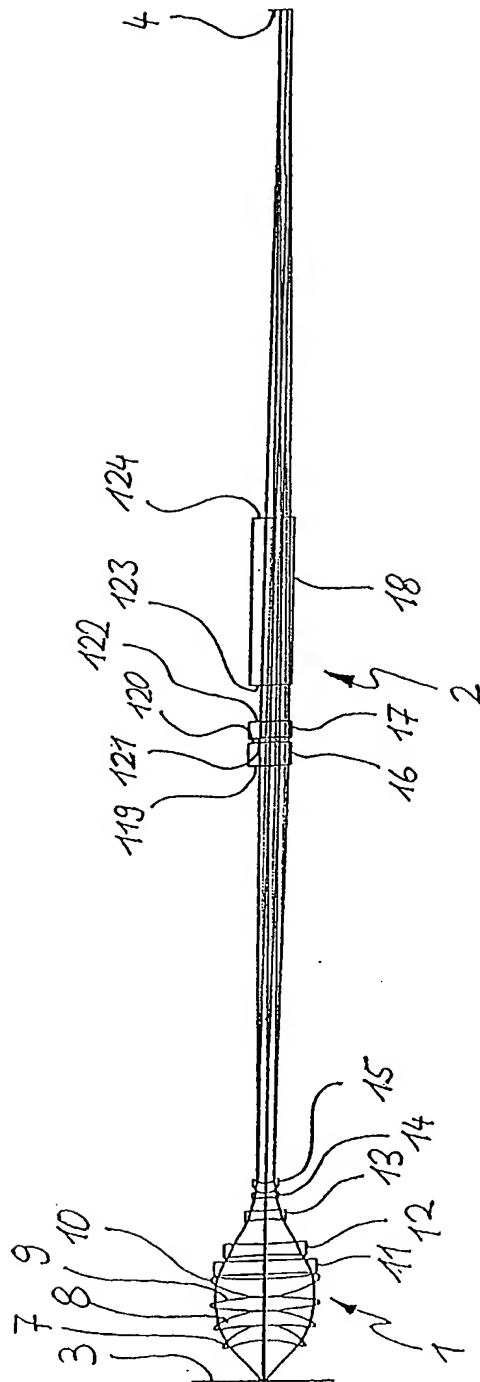


Fig. 1

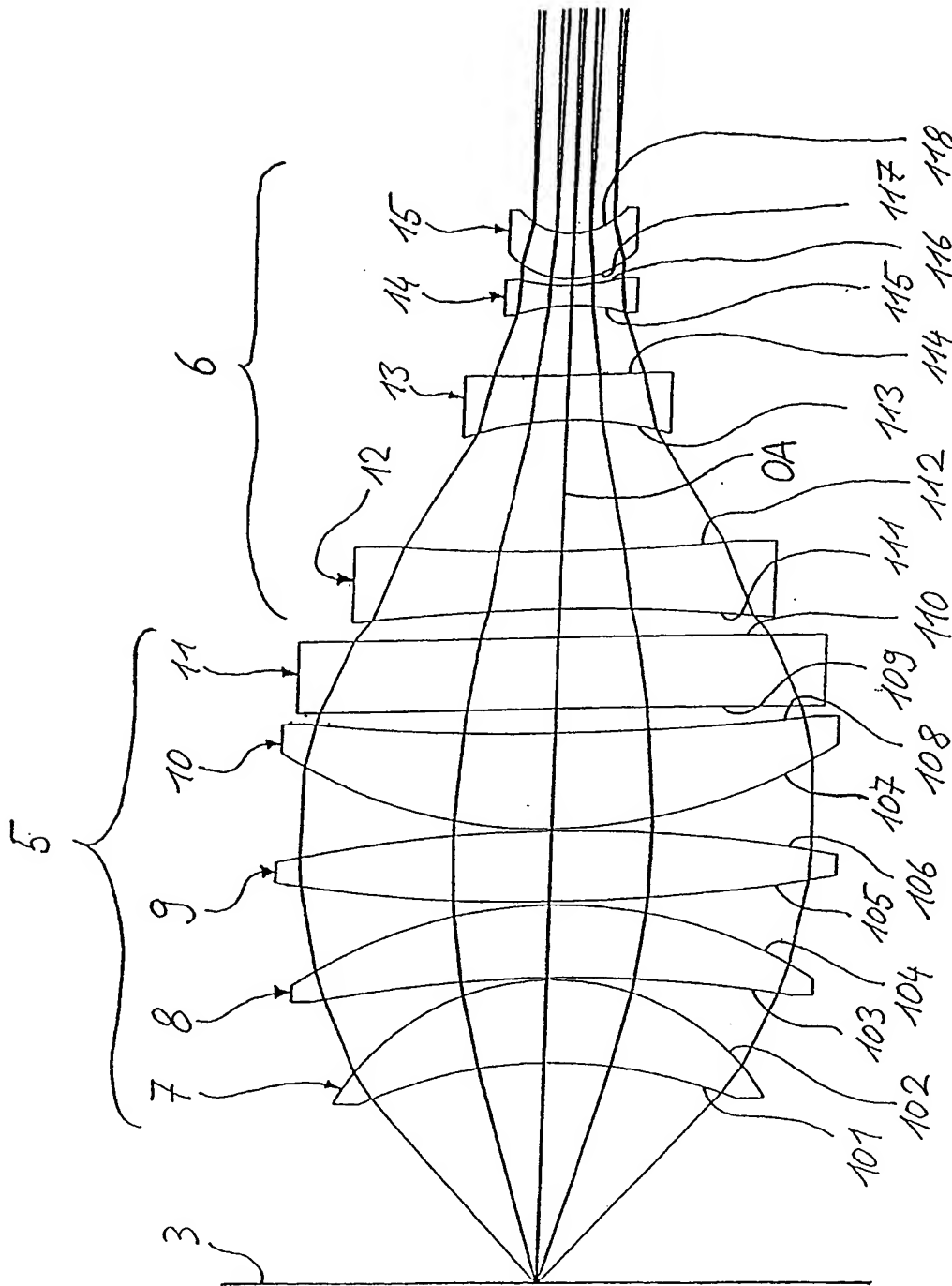


Fig. 2

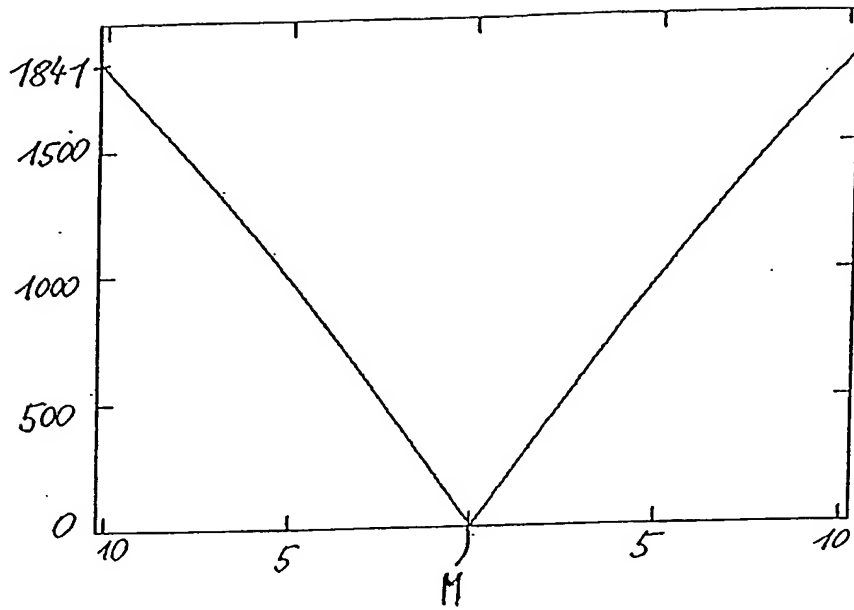


Fig. 3

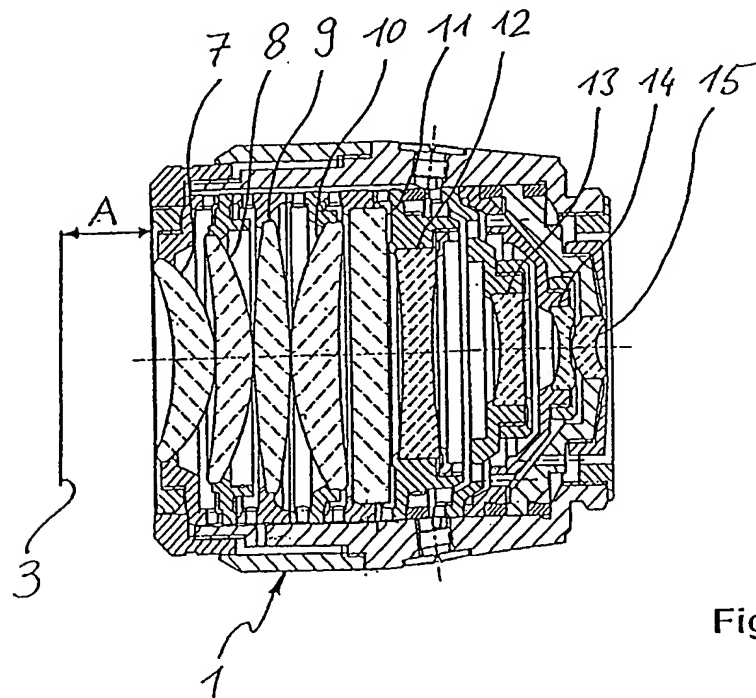


Fig. 4

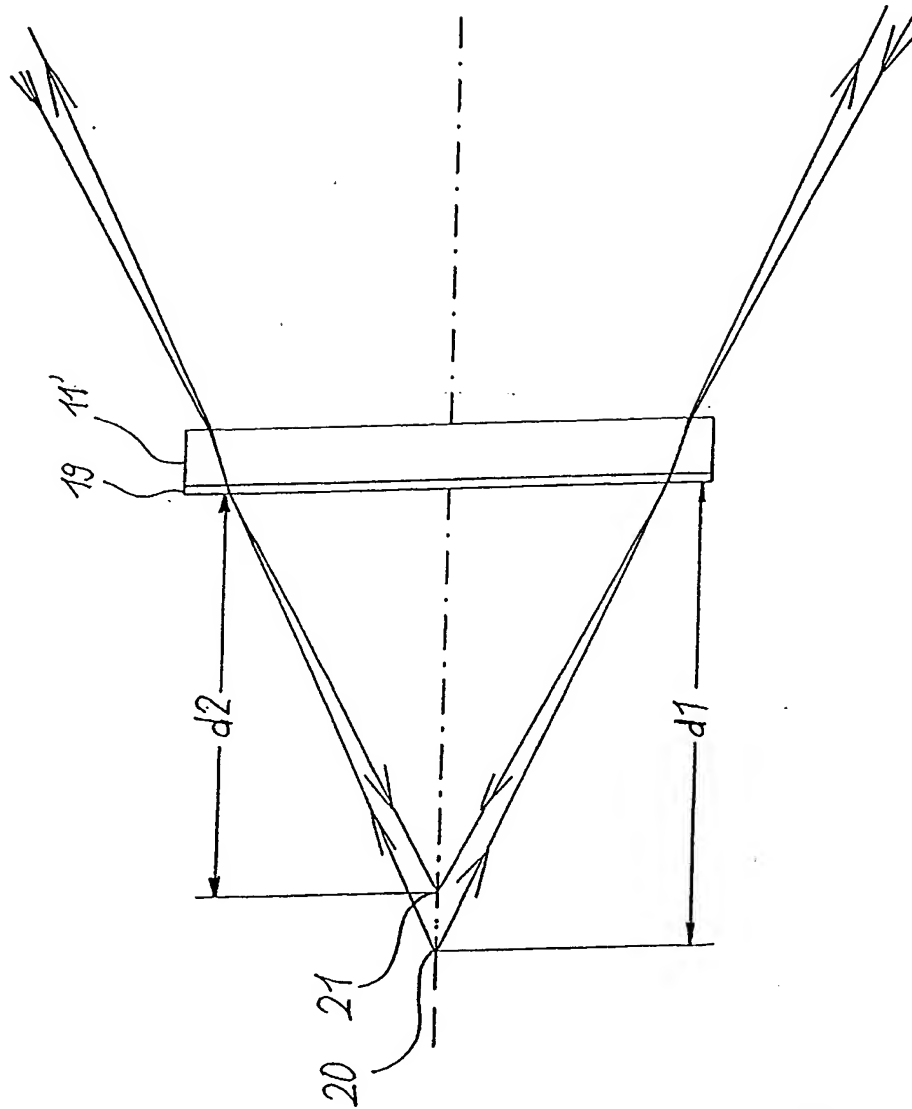


Fig. 5